

PEG-6000 引发对老化大豆种子膜透性及保护性酶活性的影响

王曙光¹ 赵建奎², 宁幸莲³ 史雨刚¹ 孙黛珍¹

(1. 山西农业大学 农学院, 山西 太谷 030801; 2. 运城市农业机电工程学校, 山西 运城 044000; 3. 万荣县农业委员会, 山西 万荣 044200)

摘要:以3个大豆品种黑珍珠、晋豆19和晋大74种子为试材,在高温($(48 \pm 1)^\circ\text{C}$)、高湿(100%相对湿度)、密闭条件下对种子进行老化处理,再分别用10%、20%和30%的PEG-6000进行引发,然后测定各处理种子的膜透性及保护酶活性。结果表明,随着老化时间的延长,3个大豆品种种子浸泡24 h时的相对电导率均呈先下降后上升随后又下降上升的趋势;种子MDA含量逐渐上升;种子过氧化物酶(POD)活性呈先缓慢下降后缓慢升高再快速下降的趋势;超氧化物歧化酶(SOD)活性均呈先缓慢升高后快速下降的趋势。3个品种种子用不同浓度PEG-6000引发后,种子膜透性和MDA含量相对降低,保护酶活性提高,增强了种子抗性;尤其用20%和30%的PEG-6000引发后,当老化程度不是很严重时,可有效提高大豆种子的抗老化能力。

关键词:大豆;老化;PEG-6000引发;电导率;保护性酶

中图分类号:S565.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2012)06-0113-05

Effect of PEG-6000 Priming on Seed Membrane Permeability and the Activity of Protection Enzyme of Aging Soybean

WANG Shu-guang¹ ZHAO Jian-kui² NING Xing-lian³ SHI Yu-gang¹ SUN Dai-zhen¹

(1. College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. Agricultural School of Electrical and Mechanical Engineering in Yuncheng, Yuncheng 044000, China;

3. Wanrong Bureau of Agriculture, Wanrong 044200, China)

Abstract: After the seeds of 3 soybean varieties, Heizhenzhu, Jindou 19, Jinda 74 were artificially aged under the air tight condition of high temperature($(48 \pm 1)^\circ\text{C}$) and high humidity(100% relative humidity), then primed by 10%, 20% and 30% PEG-6000, variation of membrane permeability and the activities of protection enzymes were tested. The results showed that relative electrical conductivity of treated seeds decreased and then increased at first and subsequently decreased and rose again with extension of aging time; MDA content decreased continuously. POD activity declined at first slowly, then increased, finally declined rapidly; SOD activity rose slowly at first and then rapidly declined. After seeds aged of 3 soybean varieties were primed with different concentration PEG-6000, the membrane permeability and MDA content reduced relatively and the activities of protection enzymes raised. It suggested that seed resistance to abiotic stress was enhanced. In particular, after the seeds with aging slightly were primed by 20% and 30% PEG-6000, abilities of resistance to aging were significantly enhanced.

Key words: Soybean; Aging; PEG-6000 priming; Conductivity; Protection enzyme

大豆种子的子叶中含有大量蛋白质,种皮较薄,发芽口较大,具有较强的吸湿性,而且种子水分含量、温度、种皮色泽以及贮藏时间等对大豆种子活力的影响很大^[1]。对大豆贮存期间的种子老化程度、

生理生化、遗传完整性的深入研究亟待进行,否则有可能造成大豆资源的遗传漂移,或导致更新后代遗传稳定性发生变化,甚至导致珍稀大豆遗传资源的丧失^[2-3]。用PEG-6000处理种子可减慢或限制水

收稿日期:2012-09-06

基金项目:山西省回国留学人员择优资助项目(2008056)

作者简介:王曙光(1962-),男,山西临猗人,讲师,硕士,主要从事作物遗传育种研究。赵建奎为同等贡献作者。

通讯作者:孙黛珍(1964-),女,山西万荣人,教授,博士,主要从事作物遗传育种研究。

分进入种子的速度,减少种子吸胀过程中膜系统的损伤,使其在缓慢吸胀过程中逐渐对受损的膜系统进行修复,维持细胞正常的生理活动,增强种子在不良环境下的种子活力^[4-5]。

本研究首先对大豆种子进行不同程度的老化处理,再用不同浓度的 PEG-6000 对老化种子进行引发,研究引发处理后大豆种子的膜透性及保护性酶活性的变化,以便了解大豆种子贮藏过程中的衰老规律,探讨油料作物、高蛋白作物种子易劣变、寿命短、不耐贮藏的机制,阐明大豆种子劣变过程的发生发展规律;同时了解 PEG-6000 引发处理对衰老大豆种子的处理效应,为种子引发技术在大豆种子贮藏上的应用提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为黑珍珠、晋豆 19、晋大 74 这 3 个大豆品种,由山西农业大学农学院大豆育种组提供,均为 2010 年 10 月收获的种子。试验在山西农业大学作物遗传育种中心实验室进行。

1.2 试验方法

1.2.1 种子老化处理 取大小均匀完整的 3 个大豆品种的种子各 5 份,每份 300 粒,每品种共 1 500 粒种子;用 0.1% HgCl_2 消毒 10 min,然后用蒸馏水冲洗干净,晾干至种子含水量 10%。将种子用纱网袋封装好后,均匀地摆放在底部加水密封的容器中,置于干燥箱内,在高温($(48 \pm 1)^\circ\text{C}$)、高湿(100%相对湿度)密闭条件下对大豆种子进行老化处理。老化处理时间设 6 个水平,分别为 24、36、48、60、72、84 h,以未老化处理的种子为对照。处理完毕后取出种子在室温下晾 72~84 h,使种子含水量降至 10% 后待用。

1.2.2 种子引发处理 经老化处理的每品种种子分成 3 份,置于培养皿中,分别用 10%、20%、30% 的 PEG-6000 溶液于 20°C 下进行引发处理 24 h,然后用自来水反复冲洗,再将种子摊在干净的滤纸上, 25°C 室温晾干(72 h)待用。

1.2.3 种子膜透性的测定 膜透性用种子浸出液的相对电导率来表示。采用韩玉虎等^[6]的方法,每品种每处理选取大小均匀一致的种子 10 粒,用自来水冲洗干净后再用重蒸馏水冲洗,并用滤纸吸干种子表面水分。将种子置 100 mL 锥形瓶中,加 30 mL 重蒸馏水加塞置 30°C 培养箱中。用上海精密科学仪器有限公司生产的 DDSJ-308A 型电导仪(25°C),分别测 4、12、24 h 的种子浸出液电导率,测定完毕

将瓶放在电炉上煮沸 3 min,冷却后测浸出液绝对电导率,然后计算各时间段的相对电导率。每处理 4 次重复。

相对电导率 = 浸出液电导率/浸出液绝对电导率 $\times 100\%$ 。

1.2.4 种子 MDA 含量(质量摩尔浓度)测定 参照文献[7],采用 TBA(硫代巴比妥酸)比色法测定丙二醛的质量摩尔浓度。

$$b(\text{MDA})(\text{mmol/g}) = \frac{(A_{532} - A_{600}) \times V}{155 \times W}$$

式中 A_{532} 和 A_{600} 分别为 532、600 nm 处的吸光值; V 为上清液的总体积, W 为被测材料的鲜质量,155 为 1 mmol/L 三甲川在 532 nm 处的吸光系数。

1.2.5 种子保护性酶(POD、SOD)活性测定 采用愈创木酚法测定过氧化物酶活性,取光径 1 cm 比色杯 2 只,一只中加入 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH 值 6.0)作为参比,另一只加入反应混合液 3 mL(含有 pH 值 6.0 的 0.1 mol/L 磷酸缓冲液、300 g/L 过氧化氢、愈创木酚),再加入酶提取液 200 μL ,于分光光度计上测量 470 nm 处 3 min 内的光密度值。以每分钟样品光密度值变化 1.0 表示 1 个酶活单位,用 U/g 表示。

采用硝基氮蓝四唑(NBT)法测定 SOD 活性,在 5 mL 反应混合液(含有 13 $\mu\text{mol/L}$ 甲硫氨酸、75 $\mu\text{mol/L}$ NBT、2 $\mu\text{mol/L}$ 核黄素、10 $\mu\text{mol/L}$ EDTA)中加入 50 μL 酶提取液,以抑制 NBT 还原 50% 为 1 个酶活单位,用 U/(g·min)表示。

1.2.6 统计分析 应用 DPS 统计软件处理数据,用 Duncan 氏新复极差测验法进行数据比较。

2 结果与分析

2.1 PEG-6000 引发对老化大豆种子膜透性的影响

由表 1 可知,随着高温老化处理时间的延长,3 个大豆品种种子浸泡 24 h 时的相对电导率均呈先下降后上升随后又下降又上升的趋势。3 个大豆品种种子对高温老化的抗性也存在一定程度的差异,相对而言,黑珍珠对高温老化胁迫的抗性较强。3 种不同浓度的 PEG-6000 引发后,3 个参试品种种子相对电导率都有不同程度下降,只有老化时间不超过 72 h 且用 20% 和 30% 的 PEG-6000 引发后相对电导率的下降达到了显著水平,其他情况并未达到显著水平,表明老化时间超过 72 h,用 3 种浓度的 PEG-6000 引发,都不能使细胞膜的损伤得以明显修复。

表 1 引发处理对老化大豆种胚中细胞膜透性的影响(24 h)

Tab.1 Effect of priming treatment on cell membrane permeability in embryos of aged soybean seeds		相对电导率 /%		
老化处 理时间 /h Aging	PEG-6000 引发 PEG-6000 priming	Relative electrical conductivity		
		晋豆 19 Jindou 19	黑珍珠 Heizhenzhu	晋大 74 Jinda 74
CK	CK	40a	75a	52a
	10%	38a	74a	50a
	20%	33b	69b	46b
	30%	34b	71b	45b
24	CK	35a	73a	57a
	10%	32ab	71a	51ab
	20%	29b	65b	45b
	30%	27b	65b	44b
36	CK	52a	68a	40a
	10%	49a	66a	36ab
	20%	44b	60b	30b
	30%	40b	61b	31b
48	CK	36a	69a	49a
	10%	34a	67a	47a
	20%	31ab	61b	42b
	30%	28b	62b	41b
60	CK	56a	90a	75a
	10%	54a	85ab	74a
	20%	51b	75b	71b
	30%	51b	76b	70b
72	CK	84a	82a	90a
	10%	81a	80a	88a
	20%	77b	76b	87ba
	30%	75b	77b	86b
84	CK	77a	77a	84a
	10%	75ab	76a	84a
	20%	73b	74a	81a
	30%	74b	75a	80a

2.2 PEG-6000 引发对老化大豆种子 MDA 含量的影响

从表 2 可以看出 3 个大豆品种种子引发处理和未引发处理 ,在老化处理的初期 MDA 含量均有小幅下降。晋豆 19 和晋大 74 种子老化处理 24 h ,种子 MDA 含量分别比对照下降了 5. 1% 4. 8% ;而黑珍珠种子老化处理 24 ,36 h ,分别比对照下降了 6. 3% ,12. 5% 。随着老化时间的延长 ,MDA 含量逐渐上升 ,在 72 h 时黑珍珠的 MDA 含量达到最高 ,比对照提高了 90. 6% ;84 h 时晋豆 19 和晋大 74 MDA 含量达到最高 ,分别比对照提高了 107. 5% ,111. 9% 。

同等老化处理条件下供试的 3 个品种 ,引发处理后 MDA 含量均比未引发处理低。相对而言 ,10% 的 PEG-6000 引发效应较差 ,引发后 MDA 含量的降低都未达到显著水平。而 20% 和 30% 的 PEG-

6000 引发后效应明显 ,在老化处理 24 ,36 ,48 ,60 h 时 ,MDA 含量的降低多数达到了显著水平。但当老化处理超过 72 h 时 3 种不同浓度的 PEG-6000 引发后 MDA 含量下降的不明显 ,均未达到显著水平 (表 2) 。表明此时种子老化程度较高 ,PEG-6000 引发难以完全修复损伤的细胞膜。

表 2 PEG-6000 引发处理对老化大豆种子
胚中 MDA 含量的影响

Tab.2 Effect of priming treatment on MDA content in embryos of aged soybean seeds		mmol/g		
老化处 理时间 /h Aging	PEG-6000 引发 PEG-6000 priming	MDA 含量 MDA content		
		晋豆 19 Jindou 19	黑珍珠 Heizhenzhu	晋大 74 Jinda 74
CK	CK	0. 40a	0. 32a	0. 42a
	10%	0. 39a	0. 30a	0. 40a
	20%	0. 35b	0. 24b	0. 34b
	30%	0. 34b	0. 25b	0. 32b
24	CK	0. 38a	0. 30a	0. 40a
	10%	0. 36a	0. 29a	0. 38a
	20%	0. 31b	0. 23b	0. 34b
	30%	0. 31b	0. 23b	0. 30b
36	CK	0. 45a	0. 28a	0. 38a
	10%	0. 42ab	0. 26a	0. 37a
	20%	0. 37b	0. 22b	0. 33b
	30%	0. 38b	0. 23b	0. 32b
48	CK	0. 62a	0. 44a	0. 49a
	10%	0. 60a	0. 41a	0. 47a
	20%	0. 54b	0. 36b	0. 43b
	30%	0. 53b	0. 36b	0. 41b
60	CK	0. 73a	0. 53a	0. 75a
	10%	0. 72a	0. 52a	0. 74a
	20%	0. 70ab	0. 46b	0. 70b
	30%	0. 68b	0. 47b	0. 68b
72	CK	0. 70a	0. 61a	0. 78a
	10%	0. 69a	0. 60a	0. 78a
	20%	0. 67a	0. 58a	0. 76a
	30%	0. 67a	0. 57a	0. 75a
84	CK	0. 83a	0. 57a	0. 89a
	10%	0. 82a	0. 57a	0. 88a
	20%	0. 80a	0. 55a	0. 86a
	30%	0. 80a	0. 54a	0. 86a

2.3 PEG-6000 引发对老化大豆种子过氧化物酶 (POD) 活性的影响

从表 3 可以看出 ,随着高温老化处理时间的延长 ,种胚过氧化物酶(POD) 活性晋豆 19 呈先缓慢下降后缓慢升高再快速下降的趋势;黑珍珠呈先缓慢升高、再下降后缓慢升高再快速下降的趋势;晋大 74 呈先下降后上升再下降的趋势。但不同品种升高与下降的时间及幅度存在差异 ,用不同浓度 PEG-

6000 引发种胚的 POD 活性均升高,但 10% 效应不明显;而 20% 和 30% 效应明显,且与对照之间都达到了显著水平。

表 3 PEG-6000 引发处理对老化大豆种子
胚中 POD 活性的影响

Tab.3 Effect of priming treatment on POD activities
in embryos of aged soybean seeds U/(g·min)

老化处 理时间/h Aging	PEG-6000 引发 PEG-6000 priming	POD 活性 POD activities		
		晋豆 19 Jindou 19	黑珍珠 Heizhenzhu	晋大 74 Jinda 74
CK	CK	18.3b	29.5b	18.3b
	10%	19.8b	31.4b	19.3b
	20%	25.6a	37.6a	24.6a
	30%	27.4a	37.4a	25.6a
24	CK	17.8b	31.9b	17.9b
	10%	19.6b	32.5b	19.2b
	20%	23.7ab	36.7a	23.4a
	30%	26.4a	36.4a	23.9a
36	CK	16.4b	27.2b	21.2b
	10%	17.2b	28.7b	23.8b
	20%	22.5ab	37.5a	27.9a
	30%	26.7a	34.7a	28.8a
48	CK	24.7b	33.6b	20.6b
	10%	26.8b	35.8b	21.6b
	20%	31.5a	43.5a	25.1a
	30%	34.7a	41.7a	26.9a
60	CK	27.4b	36.8b	18.8b
	10%	28.1b	37.2b	19.3b
	20%	34.5a	45.5a	24.6a
	30%	36.3a	44.3a	26.3a
72	CK	13.5a	25.4b	15.4a
	10%	13.2a	26.2b	15.7a
	20%	14.5a	30.5a	16.3a
	30%	14.7a	29.7a	16.4a
84	CK	9.2a	20.8a	9.8a
	10%	9.5a	21.5a	10.2a
	20%	10.3a	22.3a	12.3a
	30%	10.7a	22.7a	12.7a

2.4 PEG-6000 引发对老化大豆种子超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

由表 4 可知,随着老化处理时间的延长,3 个大豆品种种胚超氧化物歧化酶(SOD)活性都表现为缓慢上升再快速下降的趋势,但不同品种升高与下降的时间及幅度存在差异。晋豆 19 在高温老化处理 24、36 h, SOD 活性分别比对照升高了 22.5%, 33.3%, 随后随着高温老化处理时间的延长,呈快速下降的趋势;黑珍珠在高温老化处理 24、36、48 h, 分别比对照升高了 4.2%, 21.8%, 35.8%, 随后逐渐快速下降;晋大 74 在高温老化处理的 24、36 h, 分别

比对照升高了 13.4%, 8.0%, 然后逐渐快速下降。在不同程度的老化处理下,用 10% PEG-6000 引发后种胚 SOD 活性都有所升高但都未达到显著水平。20% 和 30% PEG-6000 引发后,老化处理 0~48 h, SOD 活性的升高都达到了显著水平,老化处理超过 48 h, 未达到显著水平。

表 4 PEG-6000 引发处理对老化大豆种子
胚中 SOD 活性的影响

Tab.4 Effect of priming treatment on SOD activities
in embryos of aged soybean seeds U/(g·min)

老化处 理时间/h Aging	PEG-6000 引发 PEG-6000 priming	SOD 活性 SOD activities		
		晋豆 19 Jindou19	黑珍珠 Heizhenzhu	晋大 74 Jinda74
CK	CK	102.42b	165.67b	112.36b
	10%	105.66b	172.81b	125.76ab
	20%	124.43a	189.35a	137.83a
	30%	125.67a	194.53a	139.32a
24	CK	125.34b	172.35b	127.38b
	10%	126.55b	178.91b	130.71b
	20%	137.12a	192.42a	143.68a
	30%	139.65a	190.43a	143.56a
36	CK	136.38b	201.78b	121.45b
	10%	139.41b	211.32b	124.45b
	20%	156.77a	227.12a	138.88a
	30%	154.63a	225.68a	137.39a
48	CK	121.34b	224.36b	108.34b
	10%	125.51b	229.97b	110.61b
	20%	135.32a	242.63a	123.73a
	30%	139.49a	241.89a	125.85a
60	CK	102.31b	221.46a	95.89b
	10%	107.43b	215.12a	99.01ab
	20%	119.25a	229.32a	109.37a
	30%	121.36a	227.68a	112.34a
72	CK	73.67a	156.24a	62.12a
	10%	73.78a	158.41a	64.78a
	20%	79.81a	169.67a	67.81a
	30%	81.32a	165.18a	67.03a
84	CK	42.13a	78.41a	21.28a
	10%	43.23a	79.34a	21.35a
	20%	45.37a	81.53a	24.56a
	30%	44.79a	82.15a	23.18a

3 讨论与结论

3.1 讨论

随着逆境胁迫时间的延长,种子劣变加剧,细胞膜系统遭到破坏,种子的内容物通过膜向系统外渗出,使浸出液的电导率升高^[8]。对老化处理后大豆种子电导率的测定,能够反映种子细胞膜对高温的抵抗能力。本研究结果表明,随着高温老化处理时

间的延长 3 个大豆品种种子浸泡 24 h 时的相对电导率基本上均呈先下降后上升随后又下降再上升的趋势, 主要是因为老化前期电导率的下降是种子对高温胁迫的一种应激反应, 而后期的下降则反映了种子对高温胁迫的一种主动适应^[9]。

MDA 含量和细胞膜透性是反映细胞膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标^[10-11]。本研究发现, 随着高温老化时间的延长, 3 个大豆品种的 MDA 含量逐渐上升, 但同等老化胁迫下, 引发处理后 MDA 含量均比未引发处理低, 而且 20% 和 30% 的 PEG-6000 引发后效应明显, 引发后 MDA 含量的降低多数达到了显著水平。因此, 当种子老化不很严重时, 利用高浓度(20%~30%) 的 PEG-6000 引发种子, 可以缓解老化对种子造成的伤害。

已经证明, 抗氧化酶系统是植物体内重要的调节机制^[12], SOD、POD 是植物体内清除活性氧的关键酶类^[13-14]。当胁迫导致大量活性氧产生时, 它们能及时有效地清除自由基, 保护细胞免受活性氧的伤害^[15-16]。本研究结果表明, 随着高温老化处理时间的延长, 这 2 种保护性酶的变化有所不同, 种子过氧化物酶(POD) 活性呈先缓慢下降后缓慢升高再快速下降的趋势; 超氧化物歧化酶(SOD) 活性都经历了一个先缓慢升高再快速下降的趋势, 不过不同品种升高与下降的时间及幅度存在差异。也就是说, 大豆在逆境下, SOD、POD 等酶类相互协调, 有效地清除代谢过程中产生的活性氧, 使植物体内的活性氧维持在一个相对较低的水平, 从而减轻了活性氧引起的膜脂过氧化及其伤害过程, 提高了种子的抗逆性。3 个品种用 10% 的 PEG-6000 引发后种胚中 2 种酶活性都有所升高但都未达到显著水平。在高温胁迫时间较短时, 3 个品种种子用 20% 和 30% 的 PEG-6000 引发后效果明显, 引发效果最好的时期在品种间存在差异。可见, 种子引发可能与一系列酶的协调作用有关, 从而对种子萌发后基因表达有一定影响, 进而提高了植物的抗逆能力。

3.2 结论

大豆种子经高温高湿密闭老化处理后, 随着老化处理时间的延长, 种子受损程度加大, 膜透性增加, 保护酶活性发生相应变化。黑珍珠、晋豆 19 和晋大 74 之间抗老化能力存在差异, 相对来说, 黑珍珠品种最耐老化, 而晋大 74 的耐老化能力相对较差。

3 个品种种子用不同浓度 PEG-6000 引发后, 通过降低膜透性及 MDA 含量, 提高种子保护性酶活性等来提高种子活力, 增强了种子抗性。但 10% 的 PEG-6000 引发效果不是很好, 而 20% 和 30% 的

PEG-6000 引发后, 当老化程度不是很严重时, 可显著提高大豆种子的活力, 有效提高大豆种子的抗老化能力。

20% 的 PEG-6000 对黑珍珠品种种子的引发效应最好, 而 30% 的 PEG-6000 可能更有利于晋豆 19 和晋大 74 种子的引发。

参考文献:

- [1] 麻浩, 孙庆泉. 种子加工与贮藏[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 362-366.
- [2] 卢新雄, 曹永生. 作物种质资源保存现状与展望[J]. 中国农业科技导报, 2001(3): 43-47.
- [3] Zheng G H, Jing X M. Ultradry seed storage cuts cost of gene bank[J]. Nature, 1998, 393: 223-224.
- [4] 顾龚平, 吴国荣, 陆长梅, 等. PEG 处理对大豆幼苗活力及活性氧代谢的影响[J]. 中国油料作物学报, 2000, 22(2): 26-30.
- [5] 王炜, 史雨刚, 王曙光. PEG 引发对老化大豆种子发芽及活力的影响[J]. 山西农业科学, 2011, 39(7): 650-654.
- [6] 韩玉虎, 王勇, 程慧, 等. 金薄香核桃枝条电导率的测定[J]. 华北农学报, 2007, 22(1): 56-58.
- [7] 中国科学院上海植物生理研究所. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 305.
- [8] 杨鹏辉, 李贵全, 郭丽, 等. 干旱胁迫对不同抗旱大豆品种质膜透性的影响[J]. 山西农业科学, 2003, 31(3): 23-26.
- [9] 史雨刚, 马金虎, 杨进文, 等. 高温处理对 4 个大豆品种种子发芽及活力的影响[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 409-412.
- [10] 乔燕祥, 高平平, 马俊华, 等. 两个玉米自交系在种子老化过程中的生理特性和种子活力变化的研究[J]. 作物学报, 2003(1): 123-127.
- [11] 朱俊刚, 王曙光, 李晓燕, 等. PEG 胁迫对六倍体小黑麦幼苗 SOD、POD 活性及 MDA 含量的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(18): 202-204.
- [12] 李柏林, 梅慧生. 燕麦叶片衰老与活性氧代谢的关系[J]. 植物生理学报, 1989, 15(1): 6-12.
- [13] 马文丽, 王转花. 铅胁迫对乌麦及普通小麦抗氧化酶的影响[J]. 山西农业科学, 2004, 32(2): 8-12.
- [14] 牛远, 梁建萍, 张建达, 等. 高温胁迫对华北落叶松幼苗抗氧化酶的影响[J]. 山西农业科学, 2008, 36(10): 47-49.
- [15] 李明, 王根轩. 干旱胁迫对甘草幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(4): 503-507.
- [16] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 活性氧清除系统对干旱胁迫的响应机制[J]. 西北植物学报, 2005, 25(2): 413-418.